

# **Tribologisches Verhalten von Oxid- und Nichtoxidkeramiken im isooktangeschmierten reversierenden Gleitkontakt und unter Kavitationsbeanspruchung**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau der  
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte  
Dissertation  
von

Dipl.-Ing. Ulrike Litzow  
aus Stralsund

Tag der mündlichen Prüfung: 11.12.2007  
Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. K.-H. Zum Gahr  
Korreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers



Berichte aus dem Institut für Werkstoffkunde II

Band 3/2008

**Ulrike Litzow**

**Tribologisches Verhalten von Oxid- und Nichtoxid-  
keramiken im isooktangeschmierten reversierenden  
Gleitkontakt und unter Kavitationsbeanspruchung**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7665-2

ISSN 1861-826X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

Ingenieurkeramische Werkstoffe erlangen im chemischen Anlagenbau und in der Automobilindustrie immer mehr an Bedeutung und zeigen ihr Potenzial durch die zunehmende Zahl an Einsatzgebieten. Metallische Tribopaarungen versagen unter hoher Flächenpressung und/oder Schmierung mit niedrigviskosen Medien oftmals durch Fressen und weisen einen geringen Verschleißbetrag auf. Im Hinblick auf den Einsatz in hoch beanspruchten Gleitsystemen (wie z. B. einer Hochdruck-Einspritzpumpe für Ottokraftstoff) wurden im TP C1 des Sonderforschungsbereiches 483 „Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe“ Untersuchungen an Hochleistungskeramiken durchgeführt.

Mit Bezug auf die tribologische Beanspruchung in hoch beanspruchten Pumpen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Untersuchungen zur Beanspruchung im reversierenden Gleitkontakt und unter Schwingungskavitation in Modellprüfständen durchgeführt. Die Untersuchungen wurden an handelsüblichen Oxid- und Nichtoxidkeramiken wie  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiC}$  und an lasermodifizierten Keramiken, hergestellt an der Universität Karlsruhe (TH), durchgeführt. Als Referenzmaterial wurde der Stahl 100Cr6 im vergüteten Zustand eingesetzt.

Unter reversierender Gleitbeanspruchung wurden neben der Referenzpaarung Stahl/Stahl zusätzlich Keramik-Selbstpaarungen und Keramik/Stahl- sowie Stahl/Keramik-Paarungen verwendet. Als wichtige Einflussfaktoren auf das tribologische Verhalten der Materialpaarungen, wurden die Oberflächenqualität, das Medium, die Belastung und die Gleitgeschwindigkeit sowie die Länge des zurückgelegten Gleitwegs ermittelt. Darüber hinaus war das Einlaufverhalten der Paarungen von besonderer Bedeutung, weil sich mit gezielt eingestellten Versuchsbedingungen, wie z. B. der stufenweisen Laststeigerung, eine geringere Reibungszahl und ein niedriger Verschleißbetrag erzielen ließ. Ein Modell der tribologischen Wirkmechanismen wurde für Selbstpaarungen der handelsüblichen Aluminiumoxid-Keramik entwickelt und anhand von Versuchsdaten aus Modelluntersuchungen und mikroskopischen Analysen diskutiert.

Die Untersuchungen zur Kavitationsbeanspruchung in Anlehnung an die ASTM-Norm G32-92 zeigten den Erosionsfortschritt und die Schädigungsmechanismen an unterschiedlichen Oxid- und Nichtoxidkeramiken sowie dem Stahl 100Cr6. Geringe Rauheitskennwerte, geringe Korngröße, hohe Korngrenzenfestigkeit und zweite Phasen beeinflussten die Inkubationszeit und damit den Übergang in die Erosionsphase mit Beginn des messbaren Verschleißes. Die Schädigung erfolgte durch Rissentstehung, -wachstum und anschließendem Ausbrechen von Körnern, Kornfragmenten bzw. dem Herauslösen vorhandener Phasen. In Wasser setzte der Schädigungsfortschritt im Vergleich zum Isooktan früher ein. Es wurde ein tribologisches Modell der Wirkmechanismen in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer aufgestellt und diskutiert.

## Abstract

### **Tribological characterization of oxide and nonoxide engineering ceramics under reciprocating sliding and cavitation erosion in isooctane**

Engineering ceramics offer a high potential for applications under high mechanical, tribological and/or chemical loads due to their unique combination of high hardness and stiffness, temperature stability and corrosion resistance. Therefore, ceramic components are used in a wide range of applications nowadays e.g. in chemical and automotive engineering. Metallic sliding pairs often fail due to scuffing and show low wear resistance under high contact pressure in sliding contact if lubricated with low viscous media. With regard to the application in high-pressure pumps for direct fuel injection, tribological behavior of various engineering ceramics was characterized within the frame of the Collaborative Research Centre 483 "High performance sliding and friction systems based on advanced ceramics".

Based on the analysis of the operating conditions of such a high-pressure fuel pump tribological tests were carried out in lubricated reciprocating sliding contact and under cavitation erosion using laboratory tribometers. Tests were done with commercially available oxide and nonoxide engineering ceramics such as  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SSiC}$  and a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  laser surface modified with  $\text{ZrO}_2$  at the Institute of Materials Science and Engineering II of the University of Karlsruhe (TH). The hardened and tempered steel AISI 52100 with a hardness of 800 HV was used as reference material.

Steel/steel, ceramic/ceramic, ceramic/steel and steel/ceramic sliding pairs were characterized under unlubricated reciprocating sliding conditions as well as lubricated with distilled water and isooctane. Results indicated that tribological performance of the tested sliding pairs was mainly influenced by surface quality, liquid media, normal force, sliding speed, sliding distance and second phases. Furthermore, running-in processes were of particular importance because with carefully adjusted operating conditions, e.g. stepwise increased normal force, a low friction coefficient and wear intensity could be achieved even under high loads. A model to describe the tribological mechanisms in the contact zone was developed for selfmated alumina, based on experimental data from the tribological tests, as well as topographic and microscopic analysis of the worn surfaces.

Results of the laboratory cavitation tests according to ASTM G32-92 showed that low values of surface roughness and grain size, high strength of the grain boundaries as well as second phases could positively influence wear resistance by increasing the incubation time before measureable wear set up. The damage of the cavitated surfaces typically started by crack initiation and crack growth followed by pull-out of grains and parts of grains or the preferred erosion of second phases. Tests in distilled water led to a reduced incubation time compared to tests in isooctane.

---

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Abstract

1	Einleitung .....	1
1.1	Oxidische und Nichtoxidische Hochleistungskeramik .....	2
1.2	Stahl 100Cr6 .....	7
1.3	Grundlagen der Tribologie .....	8
1.3.1	Begriffe .....	8
1.3.2	Reibung unter Mangelschmierung .....	13
1.3.3	Kavitationserosion .....	15
1.4	Tribologisches Verhalten von Hochleistungskeramik und dem Stahl 100Cr6 .....	17
1.5	Zielsetzung .....	21
2	Versuchsmaterial und experimentelle Methoden .....	23
2.1	Versuchsmaterial .....	23
2.1.1	Keramische Werkstoffe .....	23
2.1.2	Stahl 100Cr6 .....	24
2.1.3	Zwischenstoffe .....	25
2.2	Gefügecharakterisierung .....	25
2.2.1	Mikroskopische Verfahren .....	25
2.2.2	Bestimmung der Dichte .....	28
2.3	Mechanische Eigenschaften .....	28
2.3.1	Bestimmung der Härte .....	28
2.3.2	Bestimmung der Risszähigkeit .....	28
2.4	Oberflächencharakterisierung .....	29
2.4.1	Profilometrie .....	29
2.5	Tribologische Prüfung .....	31
2.5.1	Probengeometrie, Vorbereitung der Prüfkörper .....	31
2.5.2	Versuchsaufbau und -durchführung .....	33
2.5.2.1	Reversierender Gleitkontakt .....	33
2.5.2.2	Kavitationserosion .....	39

---

3	Versuchsergebnisse.....	43
3.1	Gefüge und mechanische Eigenschaften der Probekörper.....	43
3.2	Ausgangstopographien der Wirkflächen.....	46
3.3	Tribologische Eigenschaften .....	51
3.3.1	Reversierende Gleitbeanspruchung .....	51
3.3.1.1	Einfluss der Materialpaarung.....	52
3.3.1.2	Einfluss der Oberflächenqualität .....	58
3.3.1.3	Einfluss des Zwischenstoffs .....	65
3.3.1.4	Einfluss der Normalkraft.....	77
3.3.1.5	Einfluss der Gleitgeschwindigkeit.....	81
3.3.1.6	Einfluss des Gleitweges .....	83
3.3.2	Beanspruchung unter Kavitationserosion .....	84
3.3.2.1	Einfluss des Materials .....	87
3.3.2.2	Einfluss der Oberflächenqualität .....	100
3.3.2.3	Einfluss des Zwischenstoffes .....	102
4	Diskussion.....	105
4.1	Hartbearbeitung .....	105
4.2	Tribologische Eigenschaften .....	106
4.2.1	Reversierender Gleitkontakt.....	106
4.2.2	Kavitationsbeanspruchung .....	125
4.3	Folgerungen aus den Ergebnissen für praktische Anwendungen und Ausblick ....	138
5	Zusammenfassung.....	142
6	Literatur.....	145